

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25610069

研究課題名(和文) 時空間波形整形超短パルス光による可変指向性THz波の発生

研究課題名(英文) Temporal and spatial control of ultrashort pulse and its application to THz wave

研究代表者

吉澤 雅幸 (Yoshizawa, Masayuki)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60183993

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：超短光パルスの時間および空間二次元の制御を達成した。超短光パルスの時間波形制御は回折格子対とレンズによる4f光学系に空間分解能をもつ位相変調器を組み合わせることで行える。本研究では4f光学系を二重に用いることで空間二次元と時間波形の同時制御を行った。空間分解能は約0.1mmであり、これは二重4f光学系の配置による制約であり、改善が可能である。また、現在の位相変調器では時間波形のパターン数に制限はあるものの、当初の理論予測通りに制御が行えることが実証された。THz波発生については、シミュレーションにより時空間制御された光パルスによる指向性と空間分解能の確認を行った。

研究成果の概要(英文)：Temporal and 2-dimensinal spatial control of ultrashort light pulse has been achieved. The temporal pulse shape can be controlled by so called 4-f system which consists of a grating pair, lenses, and spatial phase modulator. In this research, newly proposed principle for 2D spatial and temporal control has been proved using double 4-f system and 2D phase modulator. Spatial resolution is about 0.1 mm. It can be improved, because it is determined by the present setup of the double 4-f system. Now, number of temporal shapes is limited, but it can be increased using a modulator with more pixels. The 2D spatial and temporal pulse can generate THz wave with controllable directivity and frequency. Numerical simulation shows the developed system can be used to the application of the controllable THz wave.

研究分野：光物性

キーワード：超短光パルス 時空間波形制御 THz波発生

1. 研究開始当初の背景

レーザーを光源とする光発生技術は近年大きな進歩を遂げており、波長では THz から X 線領域まで、時間的にはアト秒パルスの発生が報告されている。時間特性の制御技術としてはフーリエ合成による波形整形が確立され、任意の波形をもつ光パルス発生が可能となっている。また、空間特性の制御も行われており、光渦 (Vortex Beam) と呼ばれる特殊な光ビームの発生などが報告されている。しかし、光パルスの時間特性と空間特性を同時に制御する試みは、空間一次元の報告 (引用文献①) はあるが、二次元空間特性と時間特性の三次元を制御した例はなかった。これは、制御に用いられている位相変調器が二次元の空間特性しか持っていないためであり、三次元制御を行うには新しい制御技術の開発が必要であった。

超短光パルスは THz 波発生の有力な手段であり、近年では波面の傾きを制御することにより高強度の THz 波発生が報告されている (引用文献②)。しかし、光パルスの空間二次元の制御が達成されていなかったため、指向性など THz 波の空間的コヒーレンスを積極的に制御する試みはなかった。

2. 研究の目的

本研究では、時間波形整形用の 4f 光学系にさらに空間制御のための光学系を付け加えた二重 4f 光学系を開発し、光位相変調器を用いて空間二次元と時間を併せた三次元の波形整形を行う。現在の光位相変調器の素子数では空間波形の分解能に制限はあるが、三次元時空間波形制御が可能であることを実証する。また、このような二次元空間特性をもつ光パルスの測定方法は確立されていないため、空間分解能をもった光パルス評価法を開発することも目的とした。

時空間波形整形パルスの応用として指向性と周波数が可変な THz 波の発生を目指す。超短光パルス列の周期を可変として、周波数可変な単色 THz 波を発生する。さらに、位置により光パルスのタイミングを変えて、発生する THz 波の位相を制御する。これにより、フェイズドアレイアンテナの原理で THz 波の指向性が制御できることを示す。

3. 研究の方法

超短パルス光源としては既存のチタンサファイアレーザーを用い、時空間波形制御装置および測定装置を製作した。波形制御用の二次元光位相変調器は既存のものを用い、測定用の CCD 検出器は購入した。まず、光パルスの測定法として適切な非線形光学効果を選定し、装置性能の評価および最適化を行った。次に、空間二次元および時間の三次元波形整形の実証を行った。波形制御装置の最適化を行い、現段階での限界および将来の性能向上の可能性について検討した。

THz 波発生については、本研究で得られる

光パルスによりどのような THz 波が発生されるかをシミュレーションにより検討した。その結果に基づいて、THz 波発生および計測のための光学系の製作を行った。THz の発生と検出には非線形光学結晶である ZnTe を用いている。結果から、単色性や空間分解能をさらに高めるために必要な条件を検討した。

4. 研究成果

(1) 時空間波形整形装置

図 1 に本研究で開発した波形整形装置の原理図を示す。回折格子 (グレーティング 1, 2)、シリンドリカルレンズ (CL2, 3) および位相変調器 (SLM2) は、基本となる 4f 時間波形整形装置である。二次元の空間分解能をもつ SLM2 の水平方向は周波数分解軸であり、垂直方向は高さの違いにより異なる時間波形の整形が可能である。SLM1, 3 および CL1, 4 は、外側の 4f 光学系であり、SLM1 に入射するビームの領域毎に異なる時間波形整形を達成するために用いられる。

図 2 は例として、SLM1 を水平 2 分割、垂直 2 分割して異なる変調を与えた場合に、光ビームが SLM2 に集光する様子を示したものである。SLM1 には、領域によって垂直方向の間隔が異なる位相変調がかけられている。異なる角度に回折された光は、CL1 によって SLM2 の異なる高さに集光される。このとき水平方向には、内側の 4f 系を構成するグレーティング 1 と CL2 で周波数分解が行われている。SLM2 の位相変調によって波形整形が行われ、その後 CL4 と SLM3 によって光は再び平行ビームに戻される。なお、SLM1 で同じ変調を与えた領域は SLM2 の同じ高さに集光されるため、同じ時間波形をもつことになる。

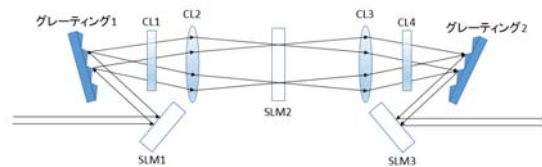


図 1. 時空間波形整形用二重 4f 光学系。SLM: 光位相変調器、CL: シリンドリカルレンズ。

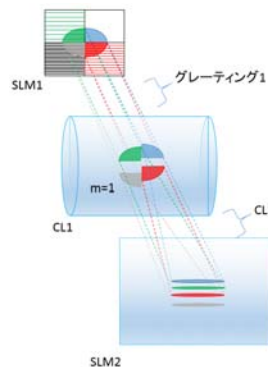


図 2. SLM1 およびグレーティングによる光パルスの空間分解の様子 (2 × 2 分割)。

空間分割可能な数と時間波形のパターン数は、SLM1, 2, 3 の素子数とその大きさにより制限を受ける。SLM1, 3 で回折された光は SLM2 上で十分に分離される必要があるため、現有の光位相変調器（浜松ホトニクス, LCOS-SLM, 800x600 ピクセル, 20x20 μm ）では、20x20 程度が実用的な限界である。また、時間波形のパターン数は焦点距離と SLM2 の大きさで決定される。本研究では CL1, 4 を焦点距離 400 mm としているため、時間波形は 20 パターン程度となる。このため、20x20 の領域すべてを異なる時間波形にすることはできないが、非常に高い自由度をもつ三次元時空間波形整形を行うことができる。

(2) 光パルスの時空間特性の測定

図3が実際に製作した装置の概略である。位相変調器の数を減らすために、反射型の二重 4f 光学系としており、SL1 と SL3 は共通になっており、下半面を入射用、上半面を出射用としている。回折格子は 1200 本/mm であり、二重 4f 光学系の焦点距離は外側を 400 mm、内側を 300 mm とした。時間波形整形には位相変調器ではなく、強度変調をあたえるマスクを用いている。入射光には、増幅されたチタンサファイアレーザーを用いており、中心波長 800 nm、パルス幅 150 fs、繰り返し 1 kHz である。

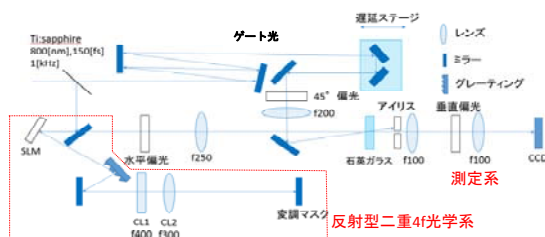


図3. 波形整形装置および光パルスの時空間特性測定用光学系。

時空間波形整形された光パルスは、位相変調器上のイメージを焦点距離 250 mm のレンズで石英ガラスに 1/10 に縮小して結像させた。購入した遅延ステージによりタイミングを制御したゲート光を石英ガラスに入射して、光カーゲートを用いた交差相関測定により光パルスの時空間特性を調べた。この方法では、第二高調波発生に比べて効率は落ちるが被測定ビームの波数ベクトルが変化しないため、空間特性の正確な測定が可能である。石英ガラス上の像を本研究で購入した CCD 検出器（ソーラボ、素子数 2048x2048, 5.5x5.5 μm ）に等倍で結像させて、高い空間分解能での測定を可能とした。

(3) 空間 2 次元波形制御の実証

開発した時空間波形整形装置の性能を実証するために、まず内側の 4f 光学系による時間波形整形を行った。まず、変調を行わない状態で光学系の群速度分散が 0 となっ

ていることを確認し、次に開口幅 1 mm、周期 2 mm の強度変調マスクにより波形整形を行った。図4はその交差相関波形であり、周期的な強度変調によりパルス列が生成されることがわかる。パルス列の周期 440 fs となり設計通りの値が得られた。

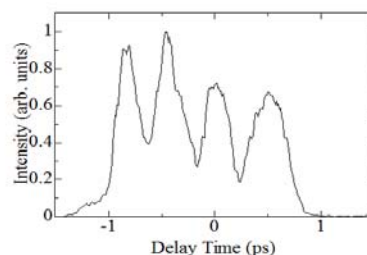


図4. 時間波形整形用 4f 光学系によるパルス列発生（交差相関信号）。

次に水平方向の空間分解を実証するために、左右の半面で遅延時間が異なるように位相変調器の制御を行った。図5がその結果であり、ゲート光遅延時間が異なる (a) (b) において、空間パターンがはっきりと変化していることがわかる。図5 (c) (d) は、(a) (b) 中に示した c, d の各線上での時間波形を示したものであり、期待通りに遅延時間が領域によって大きく変化していることがわかる。

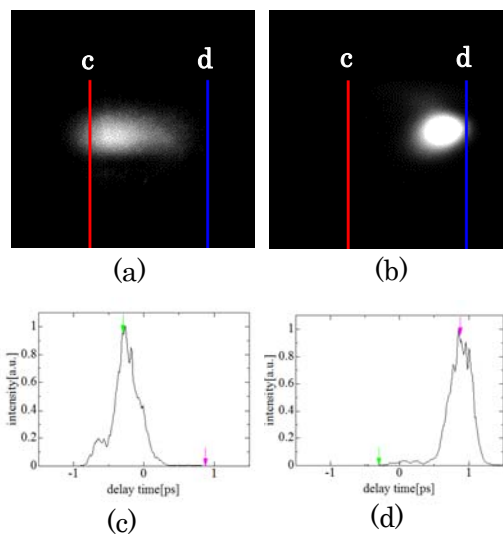


図5. 水平方向に空間分割された光パルスの時空間特性。(a) (b) : CCD カメラの映像、遅延時間 (a) -0.27 ps, (b) 0.88 ps。(c) (d) : c, d の領域の交差相関信号の時間変化。

水平方向の空間分解能を評価するために、それぞれの領域の時間波形 I_1, I_2 を用いて、その強度比を水平方向の関数として示したものが図6である。領域境界が回折により広がることを考慮してフィッティングを行うと、距離空間分解能として 111 μm が得られた。ここでは、強度比が 1/4 から 3/4 に変化する距離を分解能としている。製作した光学配置から求めた理論的空間分解能は 48 μm で

あり、レンズによる結像などの光学的調整がまだ不十分であったと思われる。

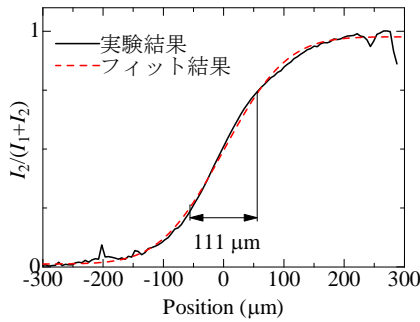


図6. 水平方向の空間分解能の評価。

水平と垂直の二次元の空間特性制御を同時に行った結果が図7である。図2のように領域を水平と垂直方向にそれぞれ2分割し、対角方向の領域には同じ遅延時間を与えている。ゲート光のタイミングによりビーム強度の空間特性が変化しており、二次元の空間制御に成功していることがわかる。なお、(b)の遅延時間 0.3 ps において対角方向以外の右上に現われている信号は、位相変調器の位相制御が不十分であるために生じた次数が異なる回折光である。これは、位相変調器の較正を行うことで除去が可能である。水平方向と同様に、垂直方向の空間分解能を評価すると 60 μm であった。

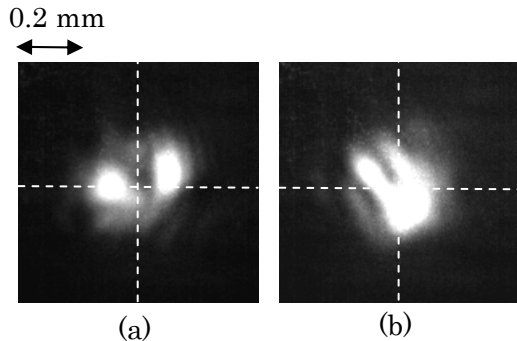


図7. 2×2に空間分割された光パルスの時空間特性。(a)遅延時間-0.3 ps, (b)遅延時間 0.3 ps。

(4) 指向性 THz 発生

時空間制御された超短光パルスの応用として指向性 THz 波の発生がある。図8はその発生と検出用の光学系を模式的に示したものである。ここでは THz 発生およびプローブ光による THz 波検出に ZnTe 結晶を用いている。波面がそろった入射光により発生された THz 波は図の実線のように光軸と同じ方向に進む。しかし、図8に示すように波面を傾けた場合には、破線のように異なる方向に伝播する。本研究の方法では空間二次元の制御が可能なので、THz 波を二次元空間で掃引することができる。放物面鏡の焦点位置にマスク

を置くことで、掃引の様子を観測することができる。

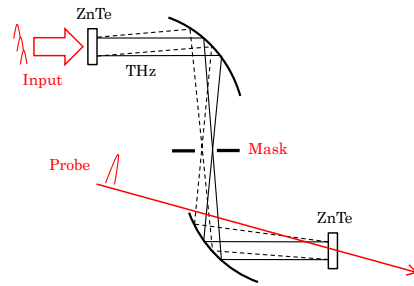


図8. 指向性 THz 波発生と検出用の光学系。

図9は THz の指向性をシミュレーションしたものである。位相変調器により 10×10 の空間分割を行い、それぞれの領域に入射する光パルスの遅延時間を変えることで発生する THz 波の位相を制御している。(a)はすべての領域が同位相の場合であり、THz 波は光軸方向に発生している。(b)は水平方向の隣り合う領域毎に $\pi/4$ の位相差をつけた場合であり、THz 波の発生方向が光軸から変化していることがわかる。(c)は垂直方向にも $\pi/8$ の位相差をつけた場合であり、THz 波の二次元掃引が可能であることを示している。(d)は位相差を $2\pi/3$ と大きくした場合である。(c)(d)では掃引角度は大きくなっているが、主ピーク以外の弱いピークが主ピークと反対側に現れている。これは、空間分割数を 10×10 と少ないために高次(-2次)の回折成分が現われてしまっているためである。高次成分は空間分割数を多くすることで実用上の問題が生じない強度まで弱めることが可能である。

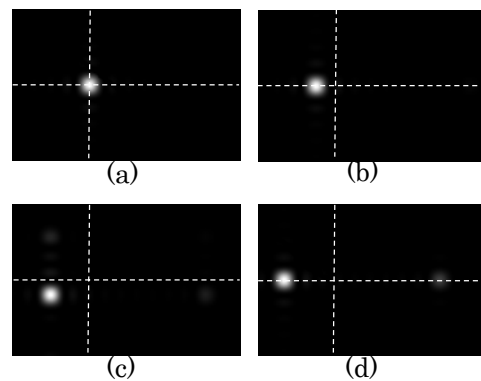


図9. 空間分割 (10×10) された光パルスによる指向性 THz 波の発生。隣接区画の位相差、(a)0, (b)x 方向: $\pi/4$, (c)x 方向: $\pi/4$, y 方向: $\pi/8$, (d)x 方向: $2\pi/3$ 。

(5) 性能向上の可能性

開発した二重 4f 光学系の問題点は、空間分解能と時間波形パターン数の制限である。空間分解能は、4f 光学系の焦点距離が異なる

ことが最大の原因である。これを解消するには、SLM1, 3 とグレーティングを同じ位置とする必要がある。理想的な解決法は位相変調器にグレーティングとしての役割も持たせることであるが、これには非常に高い空間分解能をもった位相変調器の開発が必要となる。もう一つの解決法は位相変調器表面に透過型のグレーティングを設置することであり、こちらは現在市販されている製品でも実現が可能である。

時間波形のパターン数の制限は、波形制御された光パルスの応用に関わってくる。指向性 THz 波発生では、各領域の時間波形を変える必要はなくタイミングの調整を行えばよい。この波形整形は、SLM2 による時間波形制御をすべて同じとして、SLM1 による垂直方向の変調によりタイミングを制御することで達成できる。したがって、空間分割数を SLM1, 3 の限界までとることができ、本研究で用いた位相変調器では、 50×50 を超える分割数も可能である。

(6) まとめ

本研究により、二次元空間と時間の三次元の光パルス波形制御が初めて達成された。開発された二重 $4f$ 光学系では空間分解能などの制限はあるが、これは今後の装置の進歩により改善が期待される。時空間整形光パルスの応用として指向性 THz 波発生が提案された。本研究による方法では、THz 波の掃引に機械的機構を必要としないため、高速かつ高精度の掃引が可能となる。

<引用文献>

- ① J. C. Vaughan, T. Feurer, and K. A. Nelson, *Opt. Lett.* **28**, 2408 (2003).
- ② K.-L. Yeh, M. C. Hoffmann, J. Hebling, and K. A. Nelson, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 171121 (2007).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 3 件)

- ① 篠田尚輝、吉澤雅幸、2重 $4f$ 光学系による超短光パルスの時空間波形整形、日本物理学会第 70 回年次大会、早稲田大学、東京、2015 年 3 月 23 日.
- ② M. Yoshizawa, “Multi-pump femtosecond spectroscopy and its application to primary process of photosynthesis”, The 3rd International Summer Course and Workshop on Development and Applications of Ultrafast Lasers, National Chiao Tung University, Taiwan (Aug. 4-5, 2014). (Invited)
- ③ 吉澤雅幸、マルチ励起フェムト秒分光によるカロテノイド動的過程の解明、第 11 回 AMO 討論会、大阪大学、大阪、2014 年 6 月 5-6 日. (招待講演).

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.sspp.phys.tohoku.ac.jp/yoshizawa>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉澤 雅幸 (YOSHIKAWA, Masayuki)
東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：60183993

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

篠田 尚輝 (SHINODA, Naoki)
東北大学・大学院理学研究科・大学院生